

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

АНДРЕЯ КАМИЛЬЕВИЧА КАВЕЕВА

«Синтез и структурно-стимулированные особенности эпитаксиальных гибридных магнитных наносистем»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»

Актуальность темы диссертации.

Современные требования к увеличению быстродействия и повышению энергоэффективности электронных устройств привели к быстрому развитию спинтроники. Современная спинтроника имеет дело с различными типами магнитных состояний и с различными материалами – не только полупроводниками и металлами, но также и диэлектриками. Важной задачей спинтроники является создание новых материалов и структур с заданными свойствами и хорошо контролируемым состоянием спинов. Популярными объектами для исследований являются системы “металл – топологический изолятор”, а также “металл – оксид” и некоторые другие системы, в которых используются процессы спин-зависимого токопротекания. Диссертационная работа А.К. Кавеева посвящена синтезу и исследованию свойств новых комбинаций материалов для спинтроники: гибридных систем ферромагнитный металл – топологический изолятор, наногетероструктур на основе мультикомпонентных металлических сплавов, диэлектрических эпитаксиальных слоев на подложках титаната стронция. Диссертационное исследование обеспечивает существенное продвижение в сторону дальнейшей разработки спинтронных устройств на основе магниторезистивных систем, спиновых полевых транзисторов, передающих устройств спинтроники на основе магнитных слоев, создании наноразмерных приборов на спиновых волнах. Таким образом, тематика представленной диссертационной работы, которая вносит существенный вклад в экспериментальное исследование новых гибридных материалов для спинтроники, **является актуальной.**

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Во введении дается краткий исторический обзор и общее представление о спинтронике, обсуждаются актуальность, цель и новизна работы, перечисляются основные результаты и формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описываются новые результаты, связанные с изучением изменения поверхностной зонной структуры в области точки Дирака топологического изолятора BiSbTeSe_2 при эпитаксиальном нанесении кобальта и марганца. Подробно рассмотрено раскрытие энергетической щели, приведены результаты моделирования зонной структуры бинарных соединений-аналогов. Также в первой главе представлены экспериментальные исследования магнитных свойств модифицированного кобальтом топологического изолятора, а именно – температурная зависимость магнитной восприимчивости, и подтверждено предположение о наличии компоненты намагниченности вне плоскости, что свидетельствует о наличии вклада магнитной природы в образование энергетической щели. На основании проведенного моделирования и измерений структуры и магнитных свойств материала сделан вывод о наличии упорядоченного встраивания кобальта в приповерхностный слой.

Во **второй главе** исследованы особенности формирования эпитаксиальных структур $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ на поверхности (111) кремния как с использованием флюоритовых буферных слоев, так и без них. Разработана и экспериментально исследована новая структура на основе эпитаксиальных слоев $\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y\text{Te}:\text{In}/\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}/\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ с переменным стехиометрическим составом. Показано, что изменение стехиометрического состава приводит к улучшению изолирующих свойств в его объеме при наличии топологического поверхностного состояния на поверхности.

В **третьей главе** исследованы структура и транспортные свойства новых объектов на основе эпитаксиальных пленок магнитных металлов на поверхности ряда топологических изоляторов. Выявлен спин-вентильный эффект ГМС в системе на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с металлическими контактами.

В **четвертой главе** получен интересный результат, связанный с термически стимулированной модификацией поверхностного слоя BiTeI , исходно не являющегося топологическим изолятором, но приобретающего свойства топологического изолятора при отжиге вследствие фазового перехода. Исследована кристаллическая и электронная структура этого материала до и после фазового перехода в поверхностном слое.

В **пятой главе** продемонстрированы результаты по улучшению кристаллического качества структур $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$, являющихся основой для создания магнитно-туннельных переходов. Показана возможность эпитаксиального роста упорядоченных слоев исследуемой структуры, обсуждается приобретаемая магнитная анизотропия четвертого порядка. Также в главе приведены результаты по подробному изучению и моделированию структурных изменений в около-интерфейсной области в металло-

оксидных системах на основе оксидов железа и 3d-металлов, перспективных для получения эффектов магнитной близости.

В **шестой главе** рассмотрен ряд результатов, связанных с эпитаксиальным ростом ферритов YIG и NiFe_2O_4 . Продемонстрирована возможность улучшения структурного качества в обоих случаях. Наибольшее внимание уделено NiFe_2O_4 , для которого была подобрана процедура сложного ступенчатого отжига, приводящего к существенному улучшению кристаллического качества тонких пленок данного материала при нанесении на подложки SrTiO_3 . Разносторонне исследована его кристаллическая структура, показана полная инверсия шпинели, выявлено наличие линий ферромагнитного резонанса, существенно более узких, чем в ранее исследованных пленках этого материала. Также проведено исследование других шпинелей и более сложных многокомпонентных гетероструктур.

Седьмая глава посвящена подробному анализу ростовых процессов и структурных переходов при эпитаксии MnF_2 и ZnF_2 на фториде кальция. Продемонстрировано формирование нехарактерной метастабильной в объемных кристаллах орторомбической кристаллической фазы, изучены ее магнитные и люминесцентные свойства. Также внимание уделено результатам, связанным с ростом кобальта на поверхности CaF_2 .

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна

В итоге выполнения диссертационного исследования А.К. Кавеевым получен ряд **новых** результатов, из которых, на мой взгляд, следует выделить следующие:

1. Впервые предложен механизм раскрытия энергетической щели при осаждении магнитных металлов на поверхность топологического изолятора.
2. Впервые синтезирован и исследован целый ряд новых эпитаксиальных систем, а именно: структурно упорядоченные ферромагнитные пленки на поверхности топологических изоляторов, наноструктуры на основе слоев $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ переменного состава, планарные эпитаксиальные слои $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{Si}(111)$, упорядоченная эпитаксиальная пара CoFeB/MgO с магнитной анизотропией, эпитаксиальные пленки метастабильной ромбической фазы MnF_2 и ZnF_2 .
3. Разработан оригинальный подход и впервые продемонстрирована трансформация нетопологического химического соединения BiTeI в топологический изолятор.
4. Впервые выявлен эффект гигантского магнитосопротивления с достаточно большой длиной спиновой диффузии на основе топологического изолятора с нанесенными структурно-упорядоченными контактами.

5. Впервые получены нанопленки $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{SrTiO}_3$ с магнитными свойствами, характерными для объемных кристаллов.
6. Впервые продемонстрирована эпитаксиальная стабилизация нехарактерных метастабильных структурных фаз фторидов марганца и цинка, позволяющая получить тонкие пленки новых материалов.
7. Впервые выполнено как экспериментальное, так и модельное обобщение случая структурного перехода на интерфейсе 3d-металл – оксид железа.

Все результаты являются оригинальными и получены автором впервые.

Степень обоснованности научных положений, результатов и выводов

Достоверность полученных в работе экспериментальных данных и обоснованность сформулированных на их основе научных положений определяется использованием отработанных методик синтеза исследуемых структур, применением современных методов исследований и современной измерительной аппаратуры, а также воспроизводимостью полученных данных. Полученные А.К. Кавеевым результаты и сделанные выводы согласуются с представленными в научной литературе там, где такое сопоставление возможно. Результаты работы докладывались на ряде российских и международных конференций, обсуждались в профильном сообществе, что также подтверждает их обоснованность. Таким образом, выносимые на защиту положения и выводы работы сомнений не вызывают.

Научная и практическая значимость работы

Диссертация содержит целый ряд новых экспериментальных результатов и обнаруженных эффектов. Синтезировано несколько наносистем, представляющих практический интерес в области спинтроники, и перспективных для дальнейшего изучения и совершенствования их свойств. Следует отметить четко прослеживаемую связь наблюдаемых эффектов и полученных свойств исследуемых структур с влиянием изменений, вносимых в изучаемые объекты на структурном уровне, что, несомненно, является объединяющим мотивом диссертации. Полученные результаты в целом вносят существенный вклад в развитие спинтроники, особенно в части разработки и исследования новых материалов и структур с заданными свойствами.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты представляют интерес для специалистов, работающих в области спинтроники, физики полупроводников, тонких пленок и границ раздела. Результаты диссертации, в том числе методы формирования магнитных пленок и эпитаксиальных слоев с переменным стехиометрическим составом, а также использование

структурного фазового перехода для получения топологических изоляторов могут быть использованы на предприятиях, связанных с выращиванием и использованием магнитных пленок, научных лабораториях соответствующего профиля и учебных организациях, осуществляющих подготовку специалистов в области физики полупроводников и физического материаловедения. В частности, сюда относятся ИФП СО РАН, СПбГУ, МГУ, ННГУ, МФТИ и др.

Публикации и апробация

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, хорошо построена логически и качественно иллюстрирована. Материалы диссертации опубликованы в 39 статьях в реферируемых журналах, в том числе журналах первого квартиля, рекомендованных ВАК РФ. Содержание диссертации адекватно отражено в автореферате.

Основные результаты диссертации докладывались автором на международных и всероссийских научных конференциях.

Замечания по диссертации

Наряду с несомненными достоинствами можно отметить некоторые замечания к работе.

1. В диссертации представлен целый ряд новых структур и эффектов, однако не везде полученные эффекты достаточным образом объяснены. В частности, в главе 6 разделе 6.5. рассматривается люминесценция иона хрома, и указано, что симметрия окружения Cr^{3+} понижена по сравнению с симметрией решетки. Однако причина искажений не указана, а без этого трудно найти физическую интерпретацию сокращения времени излучательного перехода.
2. В диссертации весьма подробно изучено раскрытие энергетической щели в BiSbTeSe_2 при осаждении кобальта. Также показано, что помимо кобальта, раскрытие энергетической щели осуществляется при эпитаксиальном осаждении марганца. Было ли проведено аналогичное случаю кобальта исследование кристаллической структуры и характера встраивания марганца в решетку BiSbTeSe_2 , или это осталось за рамками диссертации?
3. В диссертации практически во всех главах активно использовался метод картографирования обратного пространства с помощью трехмерной сборки картин ДБЭ. Вместе с тем, стоило бы описать метод подробнее, возможно ли применение метода не при азимутальном, а при иных направлениях вращения образца? Каким образом реальное расстояние между рефlekсами на экране дифрактометра связать с расположением модельных рефlekсов, с учетом того, что это расстояние

масштабируется для различных эпитаксиальных установок в зависимости от их геометрии?

4. В главе 3 в разделе 3.2. обсуждается полученный эффект гигантского магнетосопротивления в наноструктурах на основе металл/топологический изолятор на базе танталата свинца-скандия (PST). Величина зарегистрированного увеличения магнетосопротивления составляет 0,25%. При этом в литературе представлены гораздо большие значения, например 10-20% в работе А. Б. Грановский, М. Ильин, А. Жуков, В. Жукова, Х. Гонзалес. *Гигантское магнетосопротивление гранулированных микропроводов: спин-зависящее рассеяние в межгранульных промежутках* // ФТТ. — 2011. — Т. 53, № 2. — С. 299—301. В диссертации следовало бы провести сравнение с другими данными и оценить возможности увеличения полученного эффекта в наноструктурах.
5. В тексте совместно используются градусы Цельсия и Кельвина. Лучше было бы остановиться на чем-то одном.

Указанные замечания не затрагивают основных выводов и результатов диссертации и не снижают высокого уровня представленной для рассмотрения диссертационной работы.

Заключение

Диссертационное исследование А.К. Кавеева «Синтез и структурно-стимулированные особенности эпитаксиальных гибридных магнитных наносистем» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые экспериментальные результаты в области топологических изоляторов, синтеза тонких магнитных пленок, изучения интерфейсов и представляющую выявленные общие закономерности свойств новых комбинаций материалов, обладающих полупроводниковыми и топологическими свойствами. Работа имеет большое значение для развития спинтроники полупроводниковых, диэлектрических, металлических и гибридных структур. Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Тематика выполненных А.К. Кавеевым исследований соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»: Пункт 2. «Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе», Пункт 4. «Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления», Пункт 13. «Транспортные и оптические явления в структурах пониженной размерности».

Диссертационная работа А.К. Кавеева по форме и содержанию соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»,
профессор высшей школы фундаментальных физических исследований Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Журихина Валентина Владимировна

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», телефон: (812) 552-65-08, e-mail: zhurihina_vv@spbstu.ru